有機肥料之施用與土壤重金屬之聚積、作物吸收之關係

劉文徹[1] 李松伍[2] 王銀波[3]

摘要：目前施用於農地之有機肥料，依其來源大略可區分爲畜牧廢棄物如豬糞尿水，畜殖堆肥，都市廢棄物如下水道之污泥，垃圾堆肥，農業廢棄物如蔗渣或作物殘留，工業廢棄物如酒精廢醪。重金屬在各種有機肥料內之含量依材料之不同而不同。施用有機肥料除了可供給植物所需之微量元素，過量之重金屬負荷和不良之土壤管理，可直接造成重金屬在土壤之累積及作物之毒害。畜牧堆肥，都市垃圾污泥和農業廢棄堆肥中之Zn，Cu和Ni已發現可導致作物之毒害。重金屬在土壤之累積程度依Input-output及土壤之性質而異。作物吸收重金屬除了受土壤性質，土壤重金屬濃度，有機堆肥之種類影響外，不同品種之同一種作物在同一環境下，重金屬之吸收量亦不同。爲保護土地資源，欲施放於土壤之有機資材，其成份需要分析管制，隨有機肥料進入土壤之重金屬量，均需作年施用量及總量監測。

關鍵詞：有機肥料、土壤重金屬、作物吸收

一、前　　言

動物排泄物，植物殘體等有機物質自古以來，在未使用化學肥料前，即爲人類用以補充植物養份，增加產量之主要來源。但隨著工業之發展，人口之增加，在開發國家，緩效性之有機肥料逐漸被速效性之無機肥料取代。有機物質之施用於土壤，並非全著眼於其養份，偶而亦將土壤作爲處理有機廢棄物之場所。隨著環保意識之抬頭，及生活水準之提昇，農地生產之觀念由以往最高產量之追求，轉變爲農地之永續利用。在儘量減少能源之輸入，多利用植物殘餘及有機廢棄物，且能保持適當之產量，達到較佳之品質輸出。但有機物質之利用，尤其是工業廢棄物之土壤處理，不僅需考量其養份之回收管理，亦應注意其成份對土壤—作物—水源系統之影響，這些成份可能包括重金屬，微量有機化學毒質，病原菌，及一些可能劣化土壤物理性質，如Na之物質。重金屬在土壤之累積可以毒害作物(phytotoxic effects)。作物對重金屬之吸收可經由食物鏈 (food chain) 間接危害人體之健康。1973年之重金屬會議(Logan and Chaney, 1983)，總結列出同時可對動物及植物毒害之重金屬元素，有Cd, Pb, Hg, As, Se, Zn, Cu, 和Ni，而極可能透過食物鏈，危害人體健康者有Cd, Pb, Hg, As, Se和Zn。Chaney(1973) 更指出Cd, Cu, Ni和Zn，因作物之累積，導致人體受害之威脅性可能最高。

---

1 台灣糖業研究所農業系研究員
2 台灣糖業研究所副所長
3 國立中興大學土壤環境科學系教授

本論文之重點，在討論目前台灣主要施放於農地有機質之種類，其重金屬成份，施用後可能造成之重金屬累積，及作物吸收之情況。有機物質之分類，依美國農部之分類(USDA, 1978)，可分爲：(一)動物堆廄肥；(二)作物殘體及綠肥；(三)人類排泄物；(四)食品工業廢棄物如乳酪廠；(五)工業有機廢棄物，如酒精工廠；(六)木材工業廢棄物，都市垃圾等。人類排泄物在目前之台灣已很少被利用，而木材工業廢棄物，因C/N值太高，不易分解，亦很少施放於土壤，因此本文係依上述之分類，針對其餘四項加以討論。

二、重金屬在有機物質中之濃度及型態

重金屬在各種有機材料中之含量，依其種類之不同而異。表一、表二、表三分別爲：農家一般施用之堆廄肥，都市垃圾堆肥，家畜廄肥，地下水道污泥，常施放於農田之作物殘餘，綠肥作物，養豬廢水，及酒精工廠之廢醪等重金屬濃度。一般飼料中爲防止疾病之感染及飼料效率之提高，常添加如硫酸亞鐵、硫酸銅、碳酸錳、碘化鉀…等化學藥劑(楊，1992)，因此在畜殖有機肥料中常含高量之某種元素。As, Ca, Cl, Cr, Co, Cu, F, Fe, I, K, Mn, Mo, Na, Ni, Se, Si, Sn, V, 和Zn爲動物所必需之元素，以其排泄物所製造之堆肥，Cr, Cu, Ni, Zn之含量亦較高(表一)。下水道污泥爲污水之沈積，污水之來源有多方面的，包括家庭廢水……等，其平均重金屬含量顯然高於一般常用畜殖堆肥(表一)。根據分析報告，重金屬在下水道污泥內之含量變化極大，廢水前處理可以降低污泥中重金屬之濃度，銅管或鉛管排水道之污泥含Cu, Pb較高。都市垃圾堆肥之重金屬含量，變化亦大。作物殘餘與液體有機肥中重金屬之含量要低於固體有機堆肥。歐美各國對於農地施用有機肥料，對有機材料中重金屬之濃度均有嚴格之限制，依國情之不同亦有不同之鬆緊程度；以污泥爲例，其最高可接受限值分別爲：Cd 5, Cr 210, Cu 210, Ni 60, Pb 210, Zn 500, As 10, Hg 2 mg/kg 乾重(表四) 。中華民國中央標準局對堆肥之品質也訂有標準(表四)。台灣省對於有機肥料中之重金屬濃度亦有規定；每含1%之全氮，混合有機肥料，Cd不得高於0.00008% ，As不得高於 0.01%；雜項有機肥料As<0.004%，Ni<0.04%，Cr<0.1%，Ti<0.01%；垃圾堆肥 Hg<2 ppm，Cd<5 ppm，Ni<25 ppm，As<50 ppm，Pb<150 ppm，Cu<150 ppm，Cr<150 ppm，Zn<500 ppm；雜項有機液肥Cd<0.000075%，As<0.002% (省政府，1990)。目前台灣省對欲以土壤處理廢水者，亦列控制規範(表四)。

雷等 (1994) 分析培育八週之豬糞混合堆肥，以水萃取其陰陽離子，並以Geochem model 求其成份在水溶液中之不同化學型態，指出Zn 52%以 free ion，18%與SO_4結合，6%與CO_3結合，0.3%與PO_4結合，其餘76%與有機酸形成錯合體；100%之Cu爲有機錯合體；10%之Pb爲free ion，10%左右之Pb爲CO_3化合物，5%之Pb結合SO_4，其餘約75%之Pb與有機酸結合。Holtzclaw等人 (1978) 對污泥之部份分析中亦指出，大部份之Cu與腐植酸結合，Cd，Ni和Zn在土壤中之移動要高於Cu 。

三、有機肥施用與重金屬在土壤中之累積

隨著有機肥料之連續施用，可能導致重金屬在土壤之累積。重金屬元素除了以陽離子交換之型式積存於土壤之外，亦可能形成重金屬化合物之結晶，沈澱於土壤；或被土壤礦物之表面吸附。

重金屬在土壤內之溶解或沈澱，吸附或解附，固定或移動，係受土壤pH，CEC，有機質，粘土礦物，氧化鐵鋁含量，氧化還原電位之影響 (Logan and Chaney, 1983; Alloway, 1990)。在低pH之土壤，金屬元素之鉗合作用能降低重金屬作物之毒害，減少礦物表面之負電荷，降低重金屬之吸附量。CEC 愈大，固定重金屬之量亦大，因此 CEC高之農地，重金屬固定累積之量亦較高。土壤有機質除了增加 CEC，吸附陽離子外，亦可和重金屬元素形成錯合體。可溶性之金屬有機錯合體能減少重金屬元素之被吸附量，相對地增加其有效性。銅與鋅容易與有機結合，降低自由離子(free ion)之活性。Cd和Zn在土壤中或以單獨結晶形態，或與Fe, Al氧化物，鹼土碳酸化合物共晶，部份會結合有機物。Cr, Cu, Hg和 Pb 在土壤中之行為受氧化還原反應之影響，當 PE<-2.0時，SO_4^{2-}轉換成S^{2-}，Cu, Zn, Hg 之硫化物結晶形成。粘土礦物及氧化鐵鋁對重金屬累積之影響主要是增加CEC 及表面吸附量。

表五為台糖自營農場長期豬糞尿施灌區，土壤別之重金屬含量，表三指出銅與鋅是豬糞尿水中主要之二種重金屬。如果以30～45公分之土壤金屬含量為背景值，0～15 公分之表土表示目前之狀況，則明顯地可以看出，不論總量或有效量，Cu和Zn均有稍微累積之現象。土壤類別不同，累積程度可能不同。礦物成份不同，土粒吸附重金屬元素之力道亦不同。表六為重金屬元素在各類土壤中有效量之萃取順序，粘板岩，砂頁岩較容易釋放重金屬，而紅壤固定重金屬之能量最强(表六)。

表七為高雄市青埔垃圾場土壤重金屬總量隨剖面深度之變化。接近掩埋層之覆土層土壤，Cu，Cr和Ni之含量明顯高於表層者。相對之對照土壤，重金屬之含量表層土壤高於底層土壤。此結果說明兩個重金屬在土壤之特性: (1)在一般土壤，重金屬之移動性小，由外部塡加污染之重金屬大部停滯於表層。(2)某些重金屬元素與有機結合後可增加其移動性。重金屬之有效量分佈(表八)亦同總量分析，覆土層土壤內之重金屬含量隨地點之變化高，且其平均值均大於對照土壤,尤其是接近垃圾層之土樣。對照區內之土壤，重金屬有效量隨剖面之由上往下而遞減，這種遞減方式在全量中並不具有，此顯示重金屬在對照土壤表層之有效度高於底層; 而相對地在覆土層，則由上往下而遞增，此種遞增，一方面係由於總量之增加，另方面是由於土壤對重金屬元素吸附力之減少。元素之生物有效度取決於土壤物理，化學性質及作物間互相之關係，尤其是土壤pH和有機質。有機物質與重金屬結合成有機錯合體，決定元素之種類 (speciation) 和轉換 (transformation)，進而影響其有效度。

表九為施用酒精廢醪對土壤重金屬有效量之影響。酒精工廠廢水經濃縮後，重金屬含量有提高之趨勢(表三)，長期施灌酒精廢醪不會增加土壤重金屬之有效量(表九)。為避免土壤功能之遭受破壞，重金屬在土壤中之含量應有臨界濃度限制，國外學者(Kabata-Pendias and Pendias，1989)依試驗結果提出土壤重金屬毒害臨界值(表十)，國內專家考量台灣之地理氣候環境，土類，重金屬之特性及背景值，對環境及公共衛生可能造成之傷害，建議重金屬在土壤中最大之臨界量為：Zn 60, Cd 1.0, Cu 50, Cr 30, Ni 22, Pb 40 mg/kg土壤(環保署, 1994)。

四、有機肥施用與作物對重金屬之吸收

作物對重金屬之吸收主要受控於：(1)土壤溶液中重金屬之濃度與型態，(2) 重金屬自土壤往根之移動，(3)重金屬自根表面往內部之移動，(4)重金屬自植物地下部往地上部之移動。植物吸收

重金屬除了取決於土壤溶液中金屬離子之總量外，亦與植物根一離子間接觸面之大小有關。不同之作物對同一金屬元素有不同之吸收量，而同一作物對不同之金屬元素亦有不同之吸收程度。以養份需要言，環保署所監控之八種元素 (As，Cd，Hg，Ni，Cr，Cu，Pb，Zn)中，Cu，Ni，Zn爲植物所需，藻類需要As，其餘之Cd，Hg，Cr，Pb爲非植物必要之微量元素。非必要微量元素不足時，沒有欠缺之效應；但當必要之微量元素如Cu和Zn缺乏時，作物可能減產；當必要或非必要微量元素超過臨界濃度時，作物之生長及產量均會減少，植株也可能出現病徵。表十爲可能導致作物毒害之土壤及作物之重金屬臨界濃度值。

表十一爲台糖公司10個糖廠，92個區號，184 個採樣點之豬糞尿灌溉區蔗渣, 蔗葉,蔗汁之平均值。蔗渣方面，Cr，Cd，Pb和 Ni之濃度均低，甘蔗莖部似乎能累積較高量之Cu和Zn。蔗葉方面，同樣的Cu，Zn，Pb和Ni較高。蔗汁方面除了Zn 之外，其餘均低，全部均在合理之濃度範圍內。Zn在植體之濃度最高並不足爲奇。植物所能累積高量之Zn，數十ppm 之植體 Zn濃度隨時可見。比較蔗體重金屬濃度與表十之作物臨界濃度值，均位安全範圍內，現場之甘蔗生育亦正常，並無任何病徵可見。

表十二爲高雄市垃圾場甘蔗中重金屬之濃度比。植體重金屬濃度與表土重金屬濃度比，係反應土壤中重金屬元素之有效量及作物吸收之特性，已涵蓋土壤，環境及作物等三因子。覆土層內植體各部位之濃度比均大於對照區內者。金屬元素吸收儲存於甘蔗各部位之大小比較，分別依序爲：根 > 枯葉> 青葉 > 蔗渣> 蔗汁。蔗汁之濃度比甚低，顯然即使垃圾場覆土層遭受重金屬之污染，且這些元素已被甘蔗吸收，但其主要之累積部位爲根和葉，蔗汁之品質並不易受影響。不同之作物對於不同之元素具有吸收或排斥性。即使同一作物，不同之部位亦具有不同之元素累積性(Kabata-Pendias and Pendias，1989)。 Dowdy 和 Larson (1975)指出，植物之營養組織所含之金屬元素，一般要高於果實或塊莖。表十二亦指出，Zn，Cu，Cr，Ni四種元素相對地較容易被甘蔗吸收，並傳輸至地上部，此符合 Kabata-Pendias 和 Pendias之報告(1989)。在某些作物，Ni和Zn之最高累積程度可大於植體乾重之10%，而Cr約爲1～3%，Cu爲 0.1～1%。銅在根部之濃度達149 mg kg^{-1}，遠高於地下部，此顯示 Cu之吸收可能爲主動吸收 (active absorption)。 甘蔗能容忍高濃度之Cu 累積。在灌溉且施用污泥之日本農地中, 當水稻稻穀之Cu濃度爲 4 mg kg^{-1}時，其根部 Cu之含量可達560 mg kg^{-1}(Chino ，1981)。一般言之，植物根系具有高Cu保持容量(holding capacity)。鋅不論在地上部，抑或地下部，植體鋅含量均高，此係反應土壤之高Zn含量。已有報告指出，植體內Zn之濃度與土壤Zn含量成直線相關。一些學者更指出，Zn在植體中移動性高，老葉內之Zn可移至新葉(Kabata-Pendias and Pendias，1989)。蔗汁中以Cu及Zn含量稍高，但其均位於聯合國糧農及世界衛生組織 (FAO/WHO)飲料重金屬污染容許限制範圍內 (分別爲5，5 mg L^{-1})。表十三爲垃圾場覆土區和未掩埋對照區內所種植甘蔗生育及最終產量之比較。蔗齡四月時，青埔垃圾場覆土層上甘蔗之莖長爲26.4公分，僅爲照區69.6公分之 38%；蔗齡七個月時，同地區覆土層上之蔗高爲35.6公分，僅爲未掩埋對照區112.2公分之32%。同樣之趨勢亦表現於最終之莖產量上， 青埔垃圾場覆土層上之每公頃蔗產量 81公噸，僅爲對照地區145t/ha之56%。這種差異是源由於毒性物質，包括重金屬之接觸根系，導致甘蔗生育與產量之抑制。

蔗田施用酒精廢醪，如同蔗田施用含重金屬之有機肥料，Cu和Zn在植體內之含量隨地區之不同，而有不同之反應(表十四)。一般言，施灌區蔗體重金屬濃度並不顯著高於未施灌區者，蔗葉重金屬濃度大於蔗汁者。初期判斷，短期每公頃施用60 t/ha 之濃縮酒精廢醪，尚不影響甘蔗之品

質，柳營試區蔗葉Pb之濃度，對照區者等於或高於施放區者，顯然甘蔗對Pb之累積並非源自酒精廢醪之施用。Cu，Zn，Pb在蔗葉之濃度比較表十之作物植體重金屬毒害臨界值，仍位安全之範圍。蔗汁中Cu和Zn之含量均小於5 mg/L，FAO/WHO 飲料重金屬污染容許限制範圍內。

五、結　論

台灣農地重金屬之污染，均因施灌含重金屬之污水，至目前，仍未有報告指出農地之重金屬污染，係源由於有機肥料之施用，也未有正式之報告，指出田間因施用有機肥料而植體發現病徵者。以台糖蔗園爲例，長期施灌豬糞尿，蔗田土壤及蔗體均在安全限制範圍內，但在國外，已有報告指出，過量施用畜殖堆肥，都市垃圾堆肥，及農業廢棄物堆肥而導致Zn，Cu，Ni在土壤內之累積，毒害作物者，因此有機肥之品質仍需控制，重金屬在土壤內之總量及年施用量均需管制。日本與歐美等先進國家均極重視土壤之保育。欲置放於土壤，即使是有機資材，其成份仍需接受分析檢定，監測管制。我國在這方面亦應立法，給予土壤－生物之生命源作適當之保護。

表一、堆肥、下水道污泥之重金屬濃度

種　類	重金屬含量 (mg kg^{-1})						資料來源
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
一般堆肥	—	9-12	12-17	14-25	—	68-122	Hsieh 等, 1990
都市垃圾堆肥	0.9-2.0	134-825	31-217	13-60	45-68	115-283	Hsieh 等, 1990
都市垃圾堆肥	8-15	56-194	1038-1053	76	65-79	485-1039	林, 1988
豬糞堆肥	ND-0.67	3.4-24.7	135-137	9-15	12-15	89-458	謝等, 1992
豬糞堆肥	ND-7.0	3-8486	6-301	3.5-176	0.5-60	35-623	Yang, 1994
	(1.9)*	(898)	(101)	(32)	(17)	(232)	
豬糞堆肥	0.48-0.62	9.1-9.8	5.3-7.2	3.3-9.8	0.3-4.0	290-342	雷等, 1994
雞糞堆肥	1.6-3.9	3.8-4.5	72-128	23-32	18-21	201-419	謝等, 1992
雞糞堆肥	ND-6.2	1-282	9-394	1.1-3.0	ND-183	56-1147	Yang, 1994
	(1.4)	(23)	(99)	(12)	(14)	(286)	
牛糞堆肥	0.90	3.0	16	13	14	74	謝等, 1992
牛糞堆肥	ND-3.7	3.1-314	14-225	4.3-18.6	1.6-19	51-308	Yang, 1994
	(1.36)	(39)	(82)	(11)	(7.4)	(152)	
下水道污泥	7-18	37-71	135-1089	72-89	79-169	993-3160	林, 1988

* 平均

表二、作物殘餘之重金屬濃度

種類	重金屬濃度(mg kg $^{-1}$)						資料來源
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
稻草	0.52	2.0	8.0	20	3.0	34	Yang, 1994
稻草	—	8	9	18	—	67	謝等, 1992
稻草	1.53	19	29	14	8.6	130	劉等, 1994
稻殼	0.28	4.0	7.0	18	3.0	40	Yang, 1994
稻殼	—	12	7	20	—	36	謝等, 1992
稻殼	0.41	24	36	29	1.9	64	劉等, 1994
蔗渣	ND	ND	2.4	ND	ND	8.99	劉等, 1992
蔗葉	0.33	5.62	6.3	1.85	ND	31	劉等, 1992
太陽麻	—	—	12	—	—	36	謝等, 1992
作物殘餘	ND-0.2 (0.03)*	2.1-15 (6.7)	1.4-30 (15)	4.0-5.7 (4.9)	0.3-5.0 (3.0)	10-127 (53)	Yang, 1994

* 平均

表三、有機廢液之重金屬濃度

種類	重金屬濃度(mg L $^{-1}$)								參料資料
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	
養豬二級放流水*	ND	0.0006	0.029	0.008	ND	0.355	—	—	
濃縮酒精廢醪	0.46	0.63	0.99	2.98	8.15	11.96	0.58	ND	陳等, 1994

* 台糖十五個豬糞尿二級處理場之平均值

表四、污泥、堆肥、及土壤處理廢水之重金屬限制值

元素	污泥[a]	堆肥[b]	土壤處理廢水[c]
	-------mg kg^{-1}	-----	---- mg kg^{-1} ---
Cd	5	5	0.01
Cr	210	150	0.1
Cu	210	150	0.2
Ni	60	25	0.5
Pb	210	150	0.1
Zn	500	500	2.0
As	10	50	1.0
Hg	2	2	0.005

[a]: 歐美各國污泥施用於農地之限值(中值, median), Jacobs, 1990.
[b]: 中央標準局(CNS)標準.
[c]: 台灣省事業廢水土壤處理水質標準.

表五、台糖自營農場土壤別施灌豬糞尿土壤重金屬含量

土壤[a]管理組	項目[b]	深度 cm	0.1N HCl Extractable Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	4M HNO_3 Total Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			mg/Kg^{-1}											
ATL	平均	0-15	0.22	0.33	7.00	2.31	4.32	6.32	0.67	13.18	20.15	25.07	18.82	77.89
		30-45	0.22	0.30	4.15	2.13	3.80	6.11	0.71	14.13	17.50	26.40	18.67	75.66
Hc	平均	0-15	0.14	0.23	5.22	1.81	4.82	6.53	0.63	14.84	17.21	24.62	14.75	65.44
		30-45	0.15	0.23	4.34	1.63	4.55	5.37	0.65	15.34	15.57	25.68	14.77	64.10
R	平均	0-15	0.02	0.05	6.05	0.66	1.67	4.24	0.42	8.25	17.96	19.47	13.12	43.54
		30-45	0.04	0.07	3.07	0.47	1.88	2.89	0.45	8.85	13.70	21.69	14.29	43.47
ASc	平均	0-15	0.06	0.14	5.66	1.57	4.04	6.88	0.38	10.38	13.62	19.18	14.22	51.66
		30-45	0.11	0.21	5.33	1.76	4.49	9.14	0.44	12.41	14.37	20.51	15.74	57.92
ASn	平均	0-15	0.04	0.11	8.22	0.57	3.78	4.78	0.45	6.74	23.14	18.86	15.48	64.01
		30-45	0.05	0.14	5.73	0.64	3.43	4.37	0.50	7.27	18.26	21.28	16.24	67.46
AT	平均	0-15	0.16	0.29	7.26	2.43	5.97	8.30	0.71	10.77	21.82	25.03	25.90	89.73
		30-45	0.18	0.24	5.20	2.40	5.68	5.70	0.68	11.88	16.41	25.37	24.67	83.37

[a]：*ATL：粘板岩砂頁岩混合沖積，AT：粘板岩，ASn：非石灰性砂頁岩，ASc：石灰性砂頁岩，R：紅壤，Hc：低腐植灰化壤
[b]：依序爲 ATL 20, Hc 18, R 13, ASc 14, ASn 5, AT 22個樣品之平均.

表六、重金屬元素在各類土壤之0.1 N HCl萃取率順序

元素	萃取率高低順序*
Cd	ATL > AT ≒ Hc > ASc > ASn > R
Cr	AT ≒ ATL > ASn > ASc > Hc > R
Cu	ASc > ASn > AT > ATL ≒ R > Hc
Ni	AT > ASc > ATL > Hc > ASn > R
Pb	Hc > ASc > AT ≒ ASn > ATL > R
Zn	ASc > Hc > R > AT ≒ ATL ≒ ASn

* ATL：粘板岩砂頁岩混合沖積，AT：粘板岩，
ASn：非石灰性砂頁岩，ASc：石灰性砂頁岩，
R：紅壤，Hc：低腐植灰化壤

表七、青埔垃圾場土壤重金屬總量隨剖面深度之變化

地點	處理	深度 (cm)	總量 Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb
			mg kg^{-1}					
青埔	未掩埋土壤	0-10	124.0±33	22.0±6	0.76±0.08	9.0±2.9	19.6±3.4	22.5±1.0
		40-50	105.0±46	20.3±11.2	0.66±0.08	7.3±0.7	19.6±1.1	18.7±4.4
		90-100	77.5±4.5	13.5±0.5	0.75±0.18	6.8±0.1	24.4±2.0	18.6±1.9
	覆土層土壤	0-10	101.8±16.7	15.3±3.2	0.72±0.20	8.9±2.3	23.3±1.0	21.0±0.8
		40-50	94.4±10.6	14.6±4.8	0.73±0.20	9.8±0.6	23.8±1.8	22.0±7.8
		90-100	88.2±15.4	20.7±16.6	0.65±0.08	11.7±2.2	36.6±2.6	20.8±3.6

表八、青埔垃圾場土壤重金屬有效量隨剖面深度之變化

處理	深度	有效量 Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb
		mg kg^{-1}					
未掩埋土壤	0-25	13.4	7.1	0.3	ND	2.3	5.2
	25-50	6.4	7.1	ND	ND	1.0	7.4
	50-75	1.7	2.5	ND	ND	ND	5.2
	75-100	1.3	1.6	ND	ND	0.6	4.4
	100-125	1.5	0.6	ND	ND	0.2	3.5
	125-150	1.3	0.3	ND	ND	ND	3.5
覆土層土壤	0-25	3.4-6.4	1.2-3.4	ND-0.5	ND-1	0.4-0.8	1.7-14.4
		(4.4)*	(2.3)	(0.16)	(0.2)	(0.48)	(10.0)
	25-50	4.3-7.5	2.2-5.0	ND-0.3	ND	ND-1.5	4.8-7.8
		(6.1)	(3.5)	(0.1)	ND	(0.88)	(5.9)
	50-75	3.3-10.4	1.1-10.6	ND-0.2	ND-0.1	ND-0.8	2.6-11.5
		(5.1)	(4.6)	(0.04)	(0.2)	(0.48)	(6.3)
	75-100	2.7-20.1	1.0-9.8	ND-0.3	ND-0.5	ND-1.0	2.2-17.2
		(6.7)	(4.1)	(0.06)	(0.1)	(0.32)	(8.3)
	100-125	2.5-21.0	1.3-32	ND-0.3	ND-0.5	ND-1.0	3.5-16.8
		(8.4)	(9.2)	(0.2)	(0.1)	(0.4)	(8.5)
	125-150	3.5-10.8	3.0-14.0	0.2	ND-0.5	ND-2.5	6.5-15.3
		(29.8)	(6.1)	(0.2)	(0.25)	(0.83)	(8.8)

*：平均值

表九、施用酒精廢醪對土壤重金屬有效量之影響

處 理	重金屬元素有效量*							
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
	mg kg^{-1}							
柳營								
施放	0. 14	0. 37	3. 79	2. 18	5. 92	6. 73	9. 00	0. 05
對照	0. 39	0. 50	4. 48	2. 20	8. 02	7. 86	5. 85	0. 05
東後寮								
施放	0. 13	0. 54	3. 95	1. 87	5. 47	7. 57	6. 90	0. 10
對照	0. 15	0. 75	4. 06	2. 29	4. 96	8. 63	6. 45	0. 06

* : 0.1 N HCl extractable.
Data from 陳等(1994).

表十、土壤和作物之重金屬毒害臨界值 *

元素	土壤臨界濃度	作物臨界濃度
	mg kg^{-1}	
Cd	3- 8	5- 30
Cr	75- 100	5- 30
Cu	60- 125	20- 100
Ni	100	10- 100
Pb	100- 400	30- 300
Zn	70- 400	100- 400
As	20- 50	5- 20
Hg	0. 3- 50	1- 3

* Data from Kabata-Pendias, and A. Pendias (1989)

表十一、台糖自營農場長期施灌豬糞尿區植體重金屬含量

項目	元 素 含 量[a]					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg kg^{-1}					
蔗渣	ND	0. 05	2. 88	0. 12	1. 56	10. 81
蔗葉	0. 004	0. 88	3. 04	2. 87	3. 79	16. 88
蔗汁	0. 03	0. 10	0. 56	0. 43	0. 06	3. 00

[a] : 184個樣品總平均

表十二、高雄青埔垃圾場甘蔗中重金屬濃度比

部位	處理[b]	濃度比(植體/0-25 公分土壤)[a]					
		Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb
青葉	Ck.	2. 32(31. 06)[c]	0. 88(6. 29)	1. 10(0. 33)	ND(5. 62)	0. 80(1. 85)	ND(ND)
	T	9. 68(42. 61)	2. 90(6. 68)	0. 25(0. 04)	9. 25(1. 85)	4. 23(2. 03)	ND(ND)
枯葉	Ck.	3. 73(3. 73)	0. 80(0. 80)	1. 93(1. 93)	ND(ND)	1. 46(1. 46)	ND(ND)
	T	10. 18(10. 28)	2. 46(2. 46)	2. 56(2. 56)	11. 05(11. 0)	2. 58(2. 58)	ND(ND)
蔗渣	Ck.	0. 67(8. 99)	0. 33(2. 37)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)
	T	2. 53(11. 11)	1. 30(2. 98)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)
蔗汁	Ck.	0. 18(2. 41)	0. 08(0. 34)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)	ND(ND)
	T	0. 67(2. 96)	0. 70(0. 47)	0. 06(0. 01)	trace(0. 01)	ND(ND)	ND(ND)
根	Ck.	9. 73(9. 73)	6. 49(6. 49)	ND(ND)	ND(ND)	3. 29(3. 29)	ND(ND)
	T	10. 56(10. 56)	149. 19(149)	1. 38(1. 38)	2. 25(2. 25)	14. 58(14. 50)	ND(ND)

[a] : available metal content at 0-25 cm depth for soil extracted by 0.1 N HCl

[b] : Ck-check (nonlandfill soil), T-treatment (covering soil)

[c] : available content of metals in plant tissue

表十三、高雄青埔垃圾掩埋場甘蔗之莖高與產量

地點	處理	莖 高(公分)		蔗產量 (公噸/公頃) ($t\ ha^{-1}$)
		蔗齡四個月[a]	蔗齡七個月[a]	
青埔	掩埋	26. 4(38)[b]	35. 6(32)	81(56)
	未掩埋	69. 9(100)	112. 2(100)	145(100)

[a] : age of sugarcane

[b] : percentage based on the nonlandfill

表十四、施用酒精廢醪對蔗葉、蔗汁重金屬含量之影響

處理	重金屬元素含量					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg kg^{-1}					
蔗葉						
柳營對照	ND	ND	9.7	—	8.4	36.45
柳營施放	ND	ND	6.7	—	8.2	27.35
東後寮對照	ND	ND	4.5	—	5.7	19.70
東後寮施放	ND	ND	5.8	—	12.1	23.45
蔗汁						
柳營對照	ND	ND	0.79	—	ND	3.18
柳營施放	ND	ND	0.85	—	ND	2.66
東後寮對照	ND	ND	0.66	—	ND	2.23
東後寮施放	ND	ND	0.45	—	ND	1.98

六、參考資料

1.台灣省政府. 1990. 肥料管理手冊. p. 24-26. 79-肥料管理一糧一02. 南投縣 (1990).

2.林鴻淇. 1988. 都市廢棄物在有機農業之利用. 有機農業研討會論文集. 行政院農委會等. 彰化縣 (1988).

3.陳世鏈等. 1994. 台灣糖業公司濃縮酒精醪液體肥料施放農場對環境及作物影響之研究. 台糖公司公安環保處83年度研究試驗報告.

4.雷通明、劉文徹、曾景山. 1994. 有機農法增進土壤地力方法之研究. 台糖糖研所82/83研究試驗報告：135-141.

5.楊盛行、隋婉君、魏嘉碧、陸之琳. 1982. 養豬場污泥之性質及其處理. pp. 267-283. 農業資材對環境之影響研討會論文集. 中華生質能源學會與台灣大學農化系.

6.環保署. 1994. 土壤品質基準一土壤重金屬含量分級基準之建立，總論，行政院環保署.

7.劉文徹、王百祿、陳健夫、曾景山、李松伍、謝德上、姚財寶、陳芳. 1992. 土壤防治之研究. 台灣糖業研究所80/81 年期研究試驗報告: 91-109.

8.劉黔蘭、廖悅玲、王銀波. 1994. 土壤與作物重金屬污染源之推定. 83年度土壤肥料試驗研究成果報告. 台灣省政府農林廳彙編.

9.謝順景、謝慶芳、林景和、徐國男. 1992. 長期施用家畜排泄物堆肥對土壤及作物之影響. 農業資材對環境之影響研討會論文集. p. 179-194. 中華生質能源學會與台灣大學農化系. 台北市 (1992).

10.Alloway, B. J. 1990. Soil processes and the behavior of metals. In B. J. Alloway (ed.) Heavy Metals in Soils. USA and Canada: Halsted Press. pp. 7-28.

11.Chaney, R. L. 1973. Crop and food chain effects of toxic elements in sludges and effluents. In Recycling Municrpal Sludges and Effluents on Land. Nat. Assoc. St. Univ. and Land-Grant Coll., Washington, D. C., pp. 129-141.

12.Chino, M. 1981. Uptake-transport of toxic metals in rice plants. In K. Kitagishi and I. Yamane(eds). Heavy Metal Pollution in Soils of Japan, Japan Sci. Soc. Press. Tokyo, Japan. pp. 81-91.

13.Dowdy. R. H., and W. E. Larson. 1975. The availability of sludge borne metals to various vegetable crops. J. Environ. Qual. 4: 278-282.

14.Hsieh, S. C. and C. F. Hsieh. 1990. The Uses of organic matter in crop production. International Seminar on the Use of Organic Fertilizers in Crop Production., FFTC/ASPAC, pp. 1-1～1-28.

15.Holtzclaw, K. M., D. A. Keech, A. L. Page, G. Sposito, T. J. Ganje, and N. B. Ball. 1978. Trace metal distributions among the humic acid, the fulvic acid and precipitable fractions extracted with NaOH from sewage slugdes. J. Environ. Qual. 7: 124-127.

16.Jacobs, L. W. 1990. Potential hazards when using organic materials as fertilizers for crop production, Food Fertilizer Technology Center, Department of Crop and Soil Sci., Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA. Extension Bulletin NO. 313:1-29.

17.Kabata-Pendias, A., and H. Pendias. 1989. Trace elements in plants. In A. Kabata-Pendias and H. Pendias (eds.) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Florida, USA. pp. 51-109.

18.Logan, T. J., and R. L. Chaney. 1983. Utilization of municipal wastewater and sludge on land. In A. L. Page et al.(eds.) Utilization of municipal wastewater and sludge on land. University of California, Riverside, USA. pp. 253-323.

19.USDA. 1978. Improving soils with organic wastes. U. S. Dept. of Agriculture, Washington, DC. p. 157.

20.Yang, S. S., 1994. Composts and agricultural production in Taiwan Soils and Fertilizers in Taiwan. The Chinese Society of Soil and Fertilizer Sciences, Taiwan. pp. 29-62.

Relationships between organic-fertilizer application and heavy-metal accumulation in soils and uptake by crops

W. C. Liu[a], S. W. Li[a], Y. P. Wang[b]

Abstract

According to the sources, the organic fertilizers applied to agricultural land in Taiwan recently, are grouped into livestock wastes-feces and urine excreted by swine; animal manures; municipal wastes-sewage sludges and urban waste composts; agricultrual wastes-bagasse and crop residues; and industrial organics-alcoholic slop. The heavy-metal concentrations in organic fertilizers depend on the organic meterials used. Application of organic fertilizers to agricultural land could supply the micronutrients to crops, but the problems induced by heavy-metal overloading and inproper soil-management of land, which could lead to the heavy-metal accumulation in soils and cause phytotoxicity on crops, need to be considered. Zinc, copper, and nickel in livestock manures, municipal refuses, sewage sludges, and agricultural composts causing phytotoxicity have been identified. The extent of heavy-metal accumulated in soils depends on both input-output balance of heavy metals and soil characteristics applied. Soil characteristics, heavy metal concentrations in soil solutions and kinds of organic fertilizers used all affect the uptake of heavy metals by plants. Different varieties of crops have different metal-uptake, even in the same environment. In order to protect the land resources, chemical analysis of applying organic fertilizers needs to be carried out, annual loading rate and maximum cumulative amount of heavy-metal need to be controlled.

[a]: Taiwan Sugar Research Institute

[b]: National Chung-Hsiung University